

输电线路角钢塔加劲肋倾斜角度对塔脚板受力性能的影响研究

辜良雨¹,王成¹,冯杨州²,张剑伟²,王海宁²,李磊¹,何文俊¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021;
2. 国网甘肃省电力公司,甘肃兰州 730050)

摘要:现有架空输电线路杆塔结构的规程规范未明确角钢塔塔脚板加劲肋倾斜角度布置要求,通常按习惯和经验设定。依托500 kV交流及±800 kV特高压直流输电线路工程铁塔,通过有限元数值方法研究了单主材四地螺、单主材八地螺和双主材八地螺塔脚板在加劲肋不同倾斜角度下的受力性能。研究表明,加劲肋倾斜角度的改变对四地螺塔脚板的影响较小,但对八地螺塔脚板影响相对较大。所研究成果对架空输电线路角钢塔塔脚板计算和制图都有一定的指导作用。

关键词:输电塔结构;角钢塔;塔脚板;加劲肋;倾斜角度;有限元分析

中图分类号:TU 31 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)02-0081-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240214

Research on Influence of Tilt Angle of Stiffening Rib of Angle Steel Tower on Force Performance of Tower Footplate in Transmission Line

GU Liangyu¹, WANG Cheng¹, FENG Yangzhou², ZHANG Jianwei², WANG Haining²,
LI Lei¹, HE Wenjun¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Chengdu 610021, Sichuan, China;
2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract:The existing regulations and specifications for tower structure of overhead transmission line do not specify the arrangement requirements for tilt angle of stiffening rib of angle steel tower footplate, which are usually set according to customs and experiences. Relying on the towers of 500 kV AC and ±800 kV UHVDC transmission line project, the force performance of tower footplate with single main material and four anchor bolts, single main material and eight anchor bolts and double main material and eight anchor bolts under different tilt angles is analyzed by finite element numerical method. The analysis results show that the change of tilt angle of stiffening ribs has a small effect on tower footplate with four anchor bolts, but has a relatively large effect on tower footplate with eight anchor bolts. The research results play a certain guiding role in the calculation and drafting for angle steel tower footplate of overhead transmission line.

Key words: transmission tower structure; angle steel tower; tower footplate; stiffening ribs; tilt angle; finite element analysis

0 引言

塔脚板式结构是输电线路角钢塔腿部与基础连接的关键节点,因具有构造简单、施工方便以及受力性能优越等特点,广泛应用于35 kV及以上交、直流各电压等级的输电线路杆塔中^[1-2]。随着电力需求

的不断增长,输电线路逐渐向高电压、大容量以及多回路方向迅猛发展,塔脚板所承受荷载随之加大^[3-4]。因此,为保证输电线路的安全运行,对塔脚板开展精细化的研究显得尤为重要^[5]。

输电线路角钢塔塔脚板式连接通常有无加劲板和有加劲板两种布置形式,其中有加劲板形式更为常见^[6]。文献[7-8]分别围绕带加劲板的4颗地脚

螺栓和 8 颗地脚螺栓塔脚板进行了试验和理论研究,并基于屈服理论推导了两类塔脚板抗拉承载力计算公式;文献[9]通过数值模拟分析了不同加劲肋厚度和长度对八地螺塔脚板承载力的影响规律,并提出了相应的加劲板尺寸的设计建议;文献[10]从塔脚板拉力传递及分配角度,结合数值计算结果推导了考虑加劲板尺寸效应的塔脚板厚度设计公式。上述研究可以看出,关于角钢塔脚板加劲肋的研究多集中在尺寸分析方面,但并未考虑加劲肋倾斜角度对塔脚板受力性能的影响。事实上,在塔脚板设计过程中,加劲板通常有斜向和竖直两种布置型式,具体采用哪种型式,一般按习惯及经验判定,目前仍缺乏专项研究成果作为判定依据。

鉴于此,下面依托实际工程项目,结合数值分析方法,研究了不同加劲肋倾斜角度下单主材四地螺塔脚板、单主材八地螺塔脚板和双主材八地螺塔脚板对塔脚板受力性能的影响规律,并提出相应设计建议,以期为塔脚板加劲肋布置提供参考和借鉴。

1 单主材四地螺塔脚板受力性能分析

1.1 数值模型

单主材四地螺塔脚板以天星—鲁西 I、II 回 500 kV 线路工程 ZVB262 直线塔为例进行分析。该线路采用单回路架设,新建线路长度为 2×133 km,该塔塔脚板尺寸如图 1 所示。单主材四地螺塔脚板由塔脚板、靴板、主斜材和螺栓组成,采用通用有限元软件建立数值模型,其中靴板、塔脚板和主斜材均采用实体单元(C3D8R)模拟,角钢和节点板部件沿厚度方向分别划分 2 层和 3 层网格,网格大小设置为 9 mm。同时对螺栓附近区域网格进行局部加密,网格大小设置为 6 mm。边界条件方面,靴板底部和塔脚板、加劲肋底部和塔脚板以及螺栓与靴板和主斜材连接均采用绑定约束(tie),对 4 个地脚螺栓底面施加全约束。材料方面,所构模型采用双线性随动强化模型(BKIN),弹性模量和泊松比分别为 2.06×10^5 MPa 和 0.3,切线模量取弹性模量的 2%^[11],其中:斜材、底板、靴板和加劲肋均采用 Q355 钢材,屈服强度为 355 MPa;主材采用 Q420 钢材,屈服强度为 420 MPa;主斜材螺栓和地脚螺栓材质分别为 6.8 级和 8.8 级,屈服强度分别取 600 MPa 和 800 MPa。加载方面,由于加劲板倾斜后主要对塔脚板产生不利作用,而对增大靴板接触面积起到

有利作用,因此主要考虑上拔工况下加劲肋倾斜角度对塔脚板的影响。通过设计软件 Smart Tower 获得主斜材最大内力,对主材和斜材逐步施加荷载,直至塔脚板受力屈服,最终得到的单主材四地螺数值模型如图 2 所示。值得一提的是,由于所建塔脚板数值模型的边界条件、接触模拟、网格划分以及加载方式等均有较为成熟的文献支撑(后文模型类似)^[1,3],可保证数值模型的正确性。

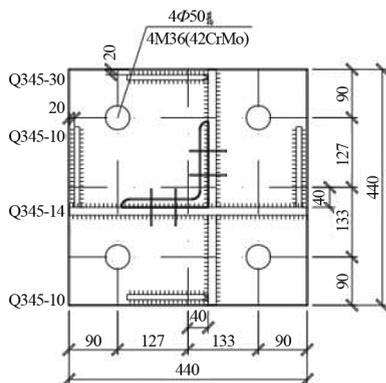


图 1 单主材四地螺塔脚板尺寸

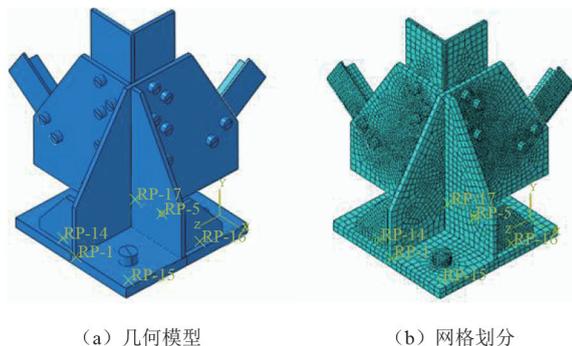


图 2 单主材四地螺塔脚板数值模型

1.2 数值模型分析结果

通过数值分析,单主材四地螺塔脚板结构的冯·米赛斯(Von Mises)云图如图 3 所示。

由图 3 可知:单主材四地螺塔脚板整体上具有较好的承载性能,见图 3(a);塔脚板与主斜材直接连接区隔应力较大,并且在螺孔以及和靴板相连区域的局部应力达到屈服,见图 3(b),但整体仍处于弹性状态;靴板应力最大部位主要集中在与主斜材相连的螺孔处和与塔脚板传力的交接处,最大 Mises 应力为 220.6 MPa,具有一定的裕度,在上拔工况条件下靴板具有良好的承载性能,见图 3(c);斜材、主材应力集中在与靴板连接位置,最大应力主要在螺孔位置,整体保持在安全范围以内,见图 3(d)、(e);地脚螺栓和杆件螺栓最大应力主要集中在螺杆以及

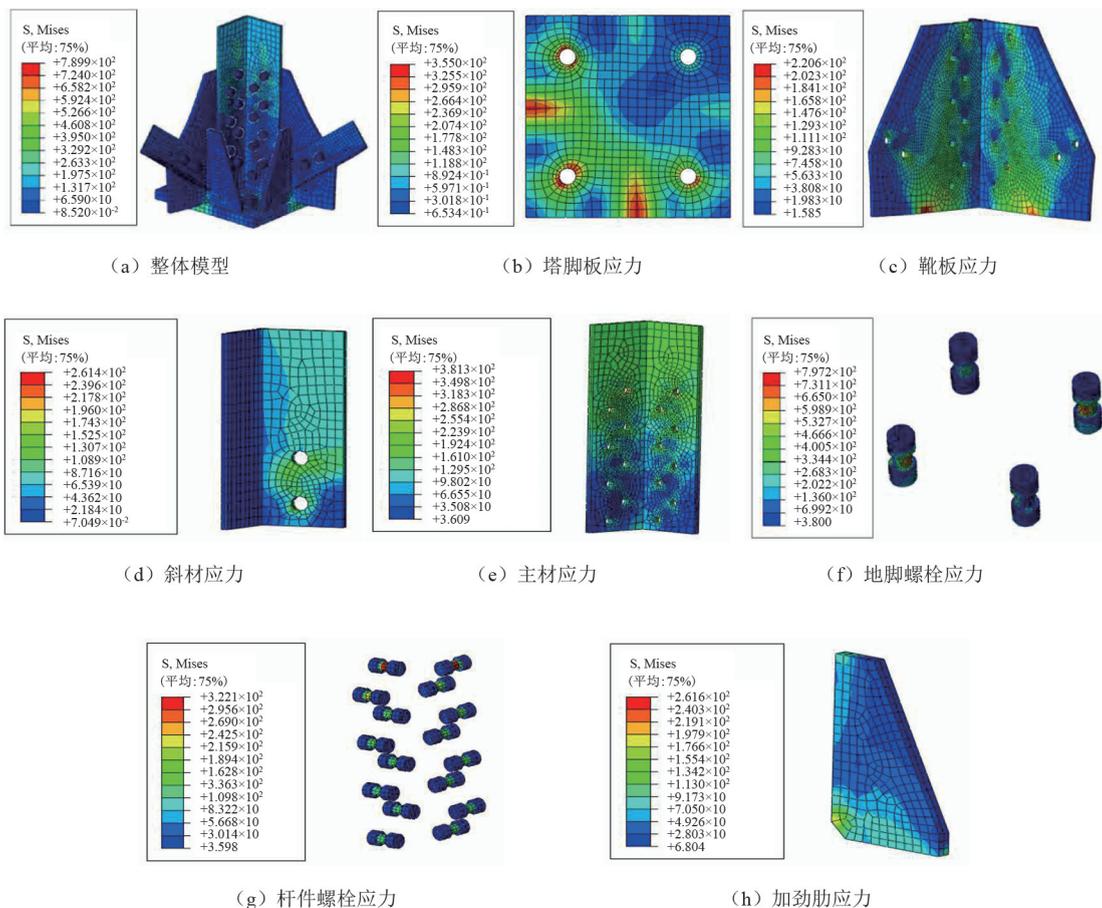


图 3 单主材四地螺塔脚板应力云图

螺帽底部,见图 3(f)、(g);加劲肋最大应力主要集中在底部与靴板交界处,见图 3(h),最大 Mises 应力为 261.6 MPa。此外,由各组件可以看出,单主材四地螺塔脚板在上拔工况下塔脚板破坏较为严重,局部区域已达到屈服,进一步验证了上拔工况下塔脚板为最不利位置。

1.3 加劲肋倾斜角度参数研究

通过改变加劲肋倾斜角度,探究不同角度对塔脚板受力性能的影响。加劲肋角度调整规则如图 4 所示。以竖向为参考线,对单个区格进行分析,保持加劲肋竖向投影高度 h 相等、腿部斜材与主材夹角

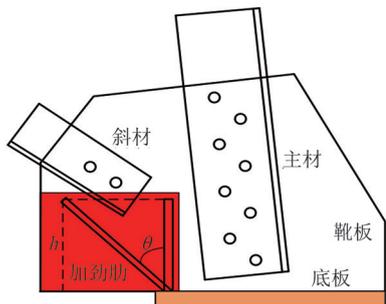


图 4 加劲肋布置

不变的情况下,通过改变内侧加劲肋夹角 θ ,分析倾斜角度对塔脚板受力性能的变化情况。鉴于加劲肋角度取值众多,难以全面考虑,因此仅对 θ 为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 以及无加劲肋 6 种工况进行分析。

6 种工况下塔脚板 Von Mises 应力云图见图 5,可以发现:不同倾斜角度下塔脚板应力屈服区域变化较小,这主要由于单主材四地螺结构所承受的上部荷载较小,塔脚板自身尚可承载,因而加劲肋的加强作用发挥较小;对比有加劲肋和无加劲肋工况,无加劲肋条件下塔脚板应力屈服较有加劲肋工况有所增大,说明增设加劲肋后可对塔脚板起到一定程度图 6 给出了单主材四地螺结构塔脚板的荷载位的加强作用。

图 6 给出了单主材四地螺结构塔脚板的荷载位移曲线,其中位移点选取塔脚板中心点进行分析。由图 6 可知,随着加劲肋倾斜角度的增大,塔脚板的承载力有一定程度降低,但降低程度在较小范围内。表 1 给出了各工况条件下塔脚板屈服的荷载信息。由表 1 可知,加劲肋倾斜角度改变后,塔脚板所能承受的荷载有所降低,无加劲时承载力降低 17.53%,

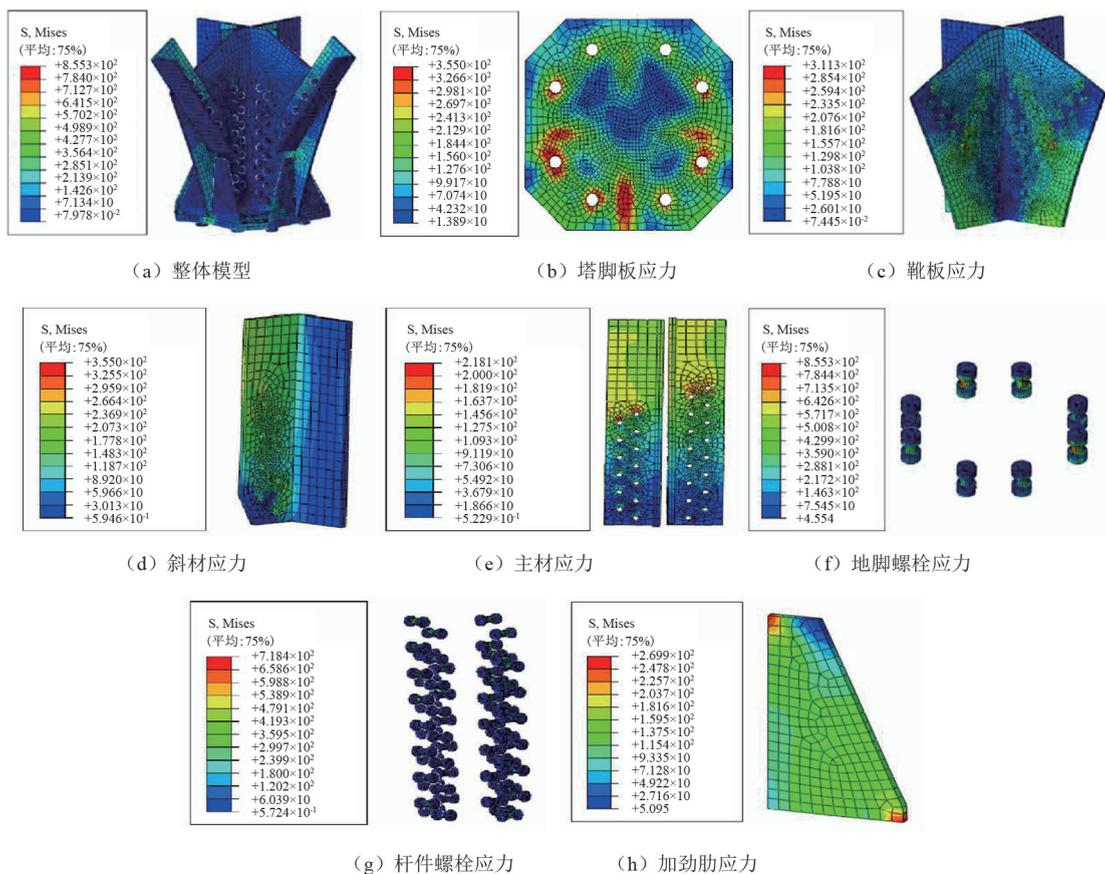


图 9 双主材八地螺塔脚板应力云图

2.2 数值模型分析结果

通过数值分析,双主材八地螺塔脚板结构的 Von Mises 应力云图如图 9 所示。可以发现:双主材八地螺塔脚板 Von Mises 应力整体上处在一个较低的水平,见图 9(a);塔脚板在与靴板相连区域应力较大,见图 9(b);靴板应力最大部位主要集中在与主斜材相连的螺孔处,最大 Mises 应力为 311.3 MPa,已接近屈服状态,见图 9(c);斜材、主材应力集中在螺孔位置,整体保持在安全范围以内,见图 9(d)、(e);地脚螺栓和杆件螺栓最大应力仍主要集中在螺杆以及螺帽底部,见图 9(f)、(g);加劲肋最大应力主要集中在顶部与靴板相连区域,见图 9(h),最大 Mises 应力为 269.9 MPa。同四地螺分析一致,后续主要研究加劲肋倾斜角度对塔脚板受力性能的影响。

2.3 加劲肋倾斜角度参数研究

各工况下的塔脚板 Von Mises 应力云图如图 10 所示。由图 10 可知:加劲肋倾斜角度在 0°~30°时塔脚板应力屈服区域大小差别不大,加劲肋倾斜角度超过 30°后,塔脚板屈服区域有较大的增长;对比有加劲肋和无加劲肋工况,塔脚板在无加劲肋条件下比有加劲肋工况下的破坏更为严重,增设加劲肋

后对双主材八地螺塔脚板加强作用较为显著。

图 11 给出了双主材八地螺结构塔脚板的荷载位移曲线。由图 11 可知,随着加劲肋倾斜角度的增大,塔脚板的承载力有所降低,在 0°~30°范围内降低程度较小。表 2 给出了各工况条件下塔脚板屈服的荷载信息。由表 2 可知,加劲肋倾斜角度改变后,塔脚板所能承受的荷载有所降低,当加劲肋倾斜至 30°时承载力可降低 5.5%,但当加劲肋倾斜至 45°时承载力降低了 16.48%,取消加劲后承载力降低了 30.77%。因此在保持加劲肋竖向投影高度同 0°加劲肋一致的情况下,建议倾斜角度在控制在 30°以内。

表 2 加劲肋对双主材八地螺塔脚板承载力影响

| 倾斜角度/(°) | 主材荷载/kN | 斜材荷载/kN | 承载力变化率/% |
|----------|----------|---------|----------|
| 0 | 3 132.91 | 758.69 | — |
| 15 | 3 098.48 | 750.35 | 1.10 |
| 30 | 2 960.77 | 717.00 | 5.50 |
| 45 | 2 616.50 | 633.63 | 16.48 |
| 60 | 2 341.08 | 566.93 | 25.28 |
| 无加劲肋 | 2 168.94 | 525.25 | 30.77 |

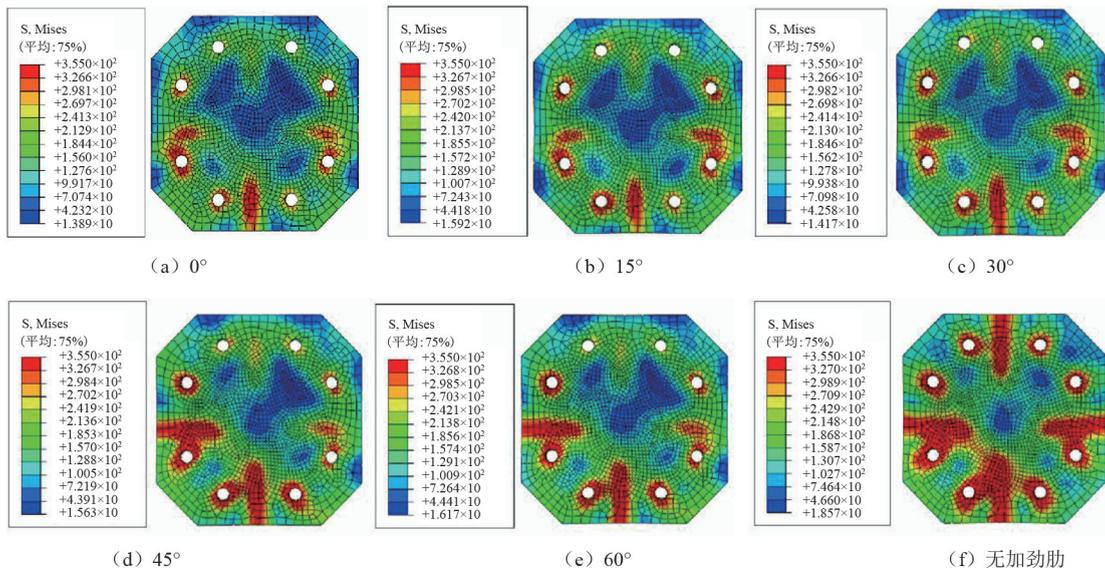


图 10 各工况下塔脚板应力云图(双主材八地螺)

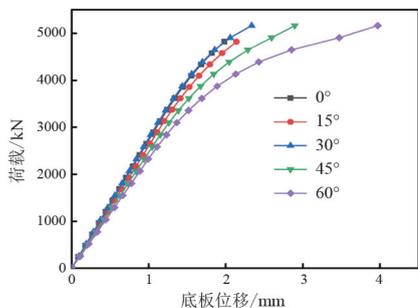
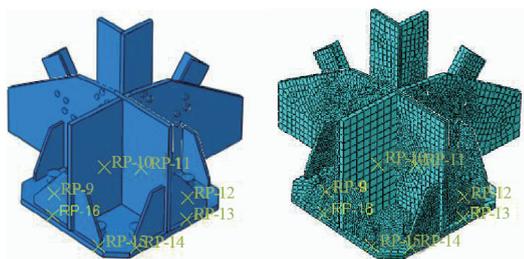


图 11 双主材八地螺塔脚板荷载位移曲线

方式、边界条件、网格划分以及荷载施加等方式均同双主材八地螺塔脚板保持一致,数值模型如图 13 所示。



(a) 几何模型 (b) 网格划分

图 13 单主材八地螺塔脚板有限元模型

3 单主材八地螺塔脚板受力性能分析

3.1 数值模型

相比双主材八地螺塔脚板,单主材八地螺塔脚板存在较大的偏心,加劲肋倾斜角度对塔脚板的受力性能影响更为显著,需单独分析。对此,以溪洛渡右岸电站送电广东±500 kV 同塔双回直流输电工程直流线路 SJ201 耐张塔为例。该铁塔采用单主材八地螺塔脚板形式,尺寸如图 12 所示。数值模型建模

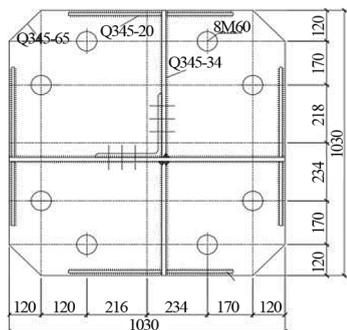


图 12 单主材八地螺塔脚板尺寸

3.2 数值分析结果

通过数值分析,单主材八地螺塔脚板结构的 Von Mises 应力云图如图 14 所示,可以发现:单主材塔脚板 Von Mises 应力整体处在弹性范围内,见图 14(a);塔脚板 4 个区隔分布存在差异,在左上区隔应力较小,说明单主材塔脚板偏心较为严重,同时加劲肋可起到有效的加强作用,见图 14(b);靴板和加劲肋局部达到屈服,见图 14(c)、(h),但整体仍处于弹性状态;斜材、主材地脚螺栓和杆件螺栓整体应力较小,均在在承载范围以内,见图 14(d)一(g)。同前文分析一致,后续主要研究加劲肋倾斜角度对塔脚板受力性能的影响。

3.3 加劲肋倾斜角度参数研究

不同倾斜角度作用下单主材塔脚板 Von Mises 应力云图如图 15 所示。由图 15 可知:随着加劲肋倾斜角度的增大,单主材塔脚板的屈服区域亦随之增大;在同等荷载作用下,塔脚板在无加劲肋条

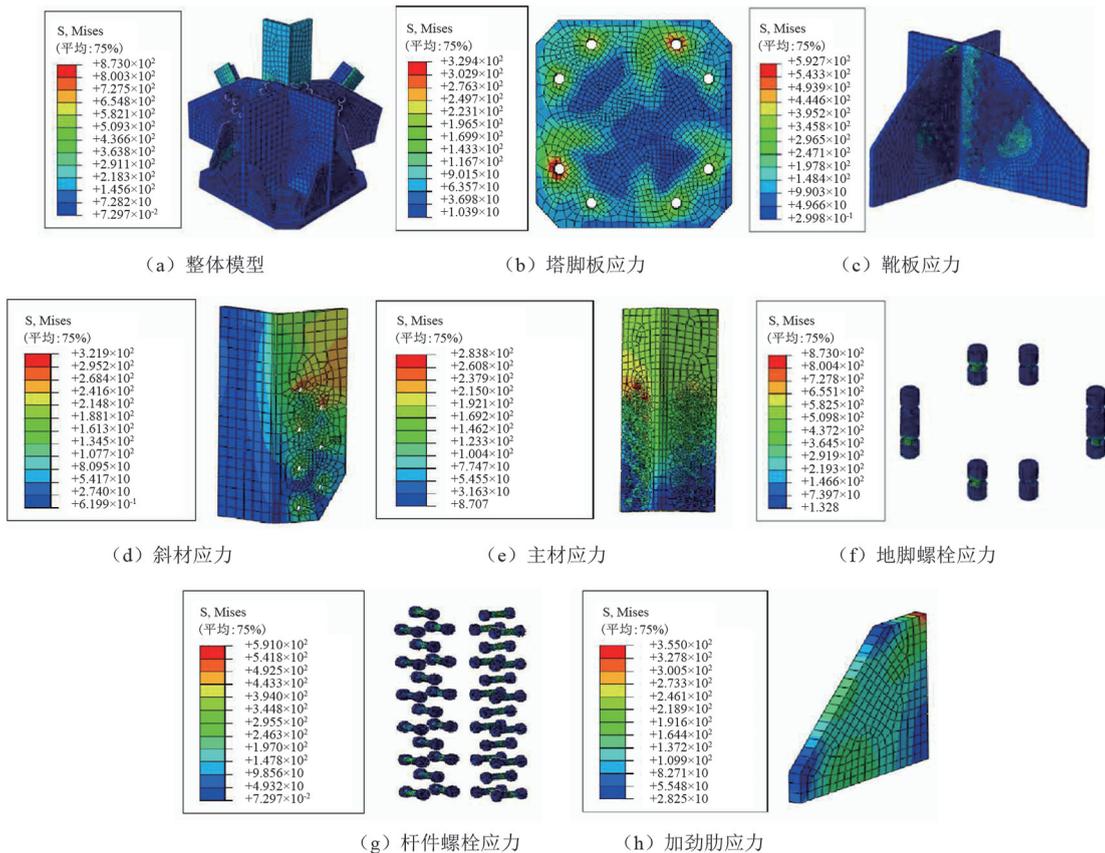


图 14 单主材八地螺塔脚板应力云图

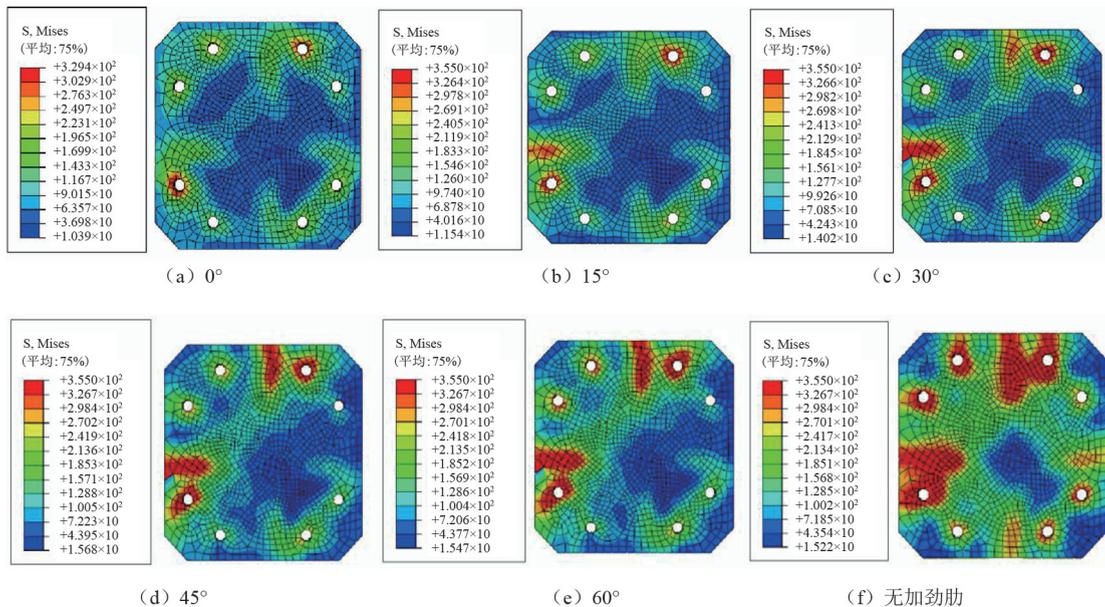


图 15 各工况下塔脚板应力云图(单主材八地螺)

件下达到屈服,而在 0°加劲肋工况下塔脚板并未破坏,增设加劲肋后单主材八地螺塔脚板承载效果大幅提高。

图 16 给出了单主材八地螺塔脚板的荷载位移曲线,可以看出,随着加劲肋倾斜角度的增大,塔脚板达到相同位移所需的外荷载随之减小,说明塔脚

板承载力有所降低。表 3 给出了加劲肋在不同倾斜角度下单主材塔脚板屈服的荷载信息。可以发现,加劲肋倾斜角度改变后,单主材塔脚板所能承受的荷载大幅降低:当加劲肋倾斜至 15°时承载力已降低 6.67%,倾斜至 30°时承载力降低了 14.29%,而取消加劲肋后承载力降低了 38.10%。因此,保持承载

力降低在 10% 以内,建议在保持加劲肋竖向投影高度同 0° 加劲肋一致的情况下,加劲肋倾斜角度控制在 15° 以内。

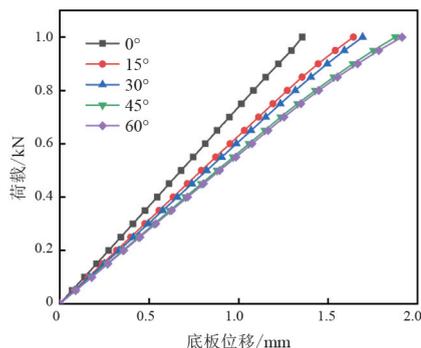


图 16 单主材八地螺荷载位移曲线

表 3 加劲肋对单主材八地螺塔脚板承载力影响

| 倾斜角度/(°) | 主材荷载/kN | 斜材荷载/kN | 承载力变化率/% |
|----------|----------|---------|----------|
| 0 | 2 934.44 | 739.41 | — |
| 15 | 5 203.73 | 655.61 | 6.67 |
| 30 | 4 628.02 | 583.08 | 14.29 |
| 45 | 4 054.55 | 510.83 | 25.71 |
| 60 | 3 835.45 | 483.22 | 30.48 |
| 无加劲肋 | 3 088.14 | 389.07 | 38.10 |

4 结 论

塔脚板受力性能研究是输电铁塔性能设计的重要内容,上面通过数值分析探究了加劲肋在不同倾斜角度下 3 类常见塔脚板的受力性能影响,得出主要结论如下:

1) 对于单主材四地脚螺栓塔脚板结构,塔脚板承载力受加劲肋倾斜角度影响相对较小。当加劲肋倾斜至 60° 时,承载力可降低 3.09%,建议设计时在保持加劲肋竖向投影高度同 0° 加劲肋一致的情况下,可适当倾斜加劲肋,但其倾斜角度不宜超过 60°。

2) 对于双主材八地脚螺栓塔脚板结构,塔脚板承载力受加劲肋倾斜角度影响较大。当加劲肋倾斜在 0°~30° 时承载力最大降低 5.5%,当加劲肋倾斜至 45° 时承载力降低了 16.48%,建议设计时在保持加劲肋竖向投影高度同 0° 加劲肋一致的情况下,倾斜角度应维持在 30° 以内。

3) 对于单主材八地脚螺栓塔脚板结构,由于主材偏心作用,塔脚板承载力受加劲肋倾斜角度影响最为显著。当加劲肋倾斜至 15° 和 30° 时,承载力分别降低 6.7% 和 14.29%,建议设计时在保持加劲肋

竖向投影高度同 0° 加劲肋一致情况下,倾斜角度应保持在 15° 以内。

需要说明的是,若设计时加劲肋倾斜角度大于建议角度,可采用部分措施进行规避,如调整铁塔本体高度、减小塔腿高度、优化加劲肋高度以及增大靴板高度等措施,必要时应通过数值计算评估其安全性。

参考文献

- [1] 何松洋,韩大刚,蒋锐,等.输电塔塔脚板式靴板连接计算方法[J].土木工程与管理学报,2021,38(4):127-132.
- [2] 蒋童,徐海潮,张树林,等.塔脚板结构强度与底板接触应力分析[J].南昌大学学报(工科版),2021,43(4):347-353.
- [3] 何松洋,鄢秀庆,李正良,等.输电角钢塔内嵌式十二地螺上拔计算理论研究[J/OL].西南交通大学学报:1-9 [2023-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230330.1207.007.html>.
- [4] 王学明,薛晓敏,文凡,等.八地脚塔脚板受拉承载力及其设计参数影响分析[J].西安交通大学学报,2020,54(3):169-178.
- [5] 俞登科,任吉华,段松涛,等.基于区格法的输电塔有劲加塔脚板强度分析[J].电力勘测设计,2017(2):42-45.
- [6] 钱小浩,杨垂玮,刘浩,等.塔脚板底板接触应力非线性分布及弯曲应力表达式[J].南昌大学学报(工科版),2022,44(1):50-58.
- [7] 刘俊卿,饶翼,文凡,等.输电铁塔四地脚螺栓塔脚板抗拉承载力试验与计算方法研究[J].应用力学学报,2020,37(1):265-271.
- [8] 刘俊卿,袁红丽,文凡,等.输电塔结构八地脚螺栓塔座板的抗拉承载力试验与计算方法研究[J].土木工程学报,2019,52(7):48-56.
- [9] 翁兰溪,周晶晶.输电铁塔塔脚板加劲肋影响分析[J].福建电力与电工,2008(1):38-41.
- [10] 付庭聪,肖奉英,孟凯,等.塔脚板劲板尺寸对底板传递力分配比的影响[J].南昌大学学报(工科版),2022,44(3):246-253.
- [11] 屈可明.输电角钢塔主材开断节点稳定承载力试验研究与有限元分析[D].重庆:重庆大学,2021.

作者简介:

辜良雨(1979),男,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;

王成(1997),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;

冯杨州(1979),男,硕士,高级工程师,主要从事电网建设技术研究和管理工作。(收稿日期:2023-07-21)